

**УСТОЙЧИВОСТЬ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ  
ПРОФИЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ  
В НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТАХ****Э.И. Михневич**, доктор технических наук, профессор**В.Е. Левкевич**, кандидат технических наук, доцент

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

**Аннотация**

Авторами предложены критерии устойчивости поперечного и продольного профиля берега водохранилища, подверженного волновой переработке, позволяющие учитывать комплекс нагрузок, действующих на отдельные частицы и элементы несвязного грунта на поверхности отмели (откоса), которые необходимы для расчета формы профиля динамического равновесия.

**Ключевые слова:** устойчивость, профиль, берег, откос, водохранилище, динамическое равновесие

**Abstract****E.I. Mikhnevich, V.E. Levkevich****FIXITY OF RESERVOIR SHORE DURING  
FORMATION OF DYNAMIC EQUILIBRIUM  
PROFILE IN INCOHERENT SOILS**

Authors describe the fixity criteria of transverse and longitudinal profile of the reservoir shore affected by the wave processing to consider pressure acting on individual particles and elements of incoherent soil in the shallow surface (slope) to calculate form of dynamic equilibrium profile.

**Keywords:** fixity, profile, shore, slope, reservoir, dynamic equilibrium

**Введение**

Процесс развития берегов, сложенных несвязными грунтами, завершается выработкой динамически устойчивого профиля с более крутым участком пляжа в зоне уреза и наката и более пологим в пределах подводного берегового склона. Конечная стадия выработки профиля берега фронтальным волнением называется профилем динамического равновесия, при котором частицы грунта на поверхности откоса совершают колебательные движения относительно условного среднего положения при равном нулю суммарном объеме перемещающихся наносов [1]. При одних и тех же параметрах действующего волнения и постоянстве среднего гранулометрического состава более мелкому материалу соответствует более пологий откос. Если же пляж сложен из фракций различной крупности то, как правило, крутизна профиля возрастает с увеличением диаметра фракции. Пока профиль не достиг динамически устойчивой формы, по нему происходит перемещение материала переработки в виде наносов вдоль и поперек уреза воды.

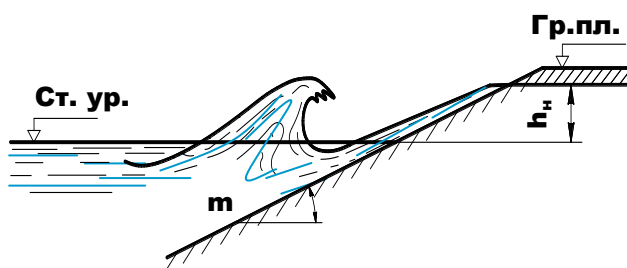
Известно, что устойчивость частиц грунта, образующего подводную часть профиля берега (откоса), формируется под действием гидродинамических нагрузок, вызванных ветровым волнением, прямыми и обратными течениями волнового потока,

и определяется допускаемыми скоростями [1-3]. При этом допускаемые скорости принимаются по значениям, полученным для условий русловых потоков [3-6]. Для определения заложения волноустойчивых откосов в морских условиях и условиях крупных водохранилищ, формируемых под воздействием волновых потоков, используются метод В.В. Лонгинова, В.П. Зенковича, С.А. Офицера, В.С. Шайтана, А.Б. Пышкина, В.Л. Максимчука, Ю.Н. Сокольников, В.С. Канарского и др. [4-9].

Решение задачи об определении условий устойчивости частиц грунта на профиле равновесия, находящихся в пределах так называемого «активного» – подвижного слоя [8, 9], наличие которого нами подтверждено натурным экспериментом по изучению режима движения наносов и развития вертикальных деформаций, до настоящего момента не рассматривалось применительно к водохранилищам Беларуси. Следует также отметить, что табличные значения скоростей потока [3-9] и зависимости по определению донных скоростей в работах [1, 9-13] приведены для условий горизонтального или слабонаклонного дна, т.е. для случая, когда на частицу не действует сдвигающая сила, являющаяся составной частью силы тяжести. И только для откосов каналов [14, 15] была получена зависимость, учитывающая сдвигающую силу. В случае расположения частиц на

поверхности подводной части береговой отмели, подверженной переработке (на первой начальной стадии формирования профиля равновесия) в результате увеличения роли этой составляющей в системе сил, определяющих их устойчивость, подвижка зерен происходит при скоростях потока меньших, чем расчетные или табличные.

Оценка влияния этого фактора при расчете профиля равновесия в рассматриваемых условиях не нашла отражения в литературе. Вместе с тем, учет его также необходим для определения крупности частиц грунта, образующего профиль динамического равновесия, а также сдвигающего действия, образующегося при накате волны на откос поверхностного потока (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Схема воздействия ветровой волны на откос**

Размыв грунтов, образующих склон, является важным фактором в нарушении устойчивости берега, подверженного переработке. Основной причиной разрушения откосов, находящихся в зоне действия волнового потока, является создание гидродинамического давления ( $P_d$ ) и грунтового потока ( $P_\phi$ ) в подстилающем слое, которое создает знакопеременное сдвигающее усилие. Учет соотношения сил, действующих на частицу грунта или расчетный объем грунта, дает возможность решить прикладную задачу по определению критерия устойчивости профиля динамического равновесия.

Из существующих методов расчета устойчивости откосов земляных сооружений, применяемых в механике грунтов, наибольшее распространение нашли графоаналитические, основанные на круглоцилиндрических поверхностях скольжения. Однако многие из них существенно различаются между собой как структурой расчетных зависимостей, так и значениями, рассчитываемых по этим зависимостям величин, дающих в ряде случаев расхождения с натурой. Более того, они являются статическими моде-

лями, отображающими устойчивость крупных грунтовых массивов, и не рассматривают местную устойчивость частиц грунта на откосе. Исключительно сложный процесс водной эрозии откосов отражается в теоретических схемах и расчетных зависимостях Н.Н. Нечипоровича, Э.И. Михневича и других авторов [14-17]. Однако эти зависимости по оценке устойчивости грунта с помощью допускаемых неразмывающих скоростей или допустимой (критической) влекущей силы [15] не учитывают влияние гидродинамических характеристик волнового потока на состояние устойчивости откоса.

#### **Устойчивость элемента грунта на поверхности откоса в волновом потоке**

Для анализа воздействия комплекса сил, действующих на элемент грунта, находящийся на поверхности береговой отмели в волновом потоке, воспользуемся методом определения предельного состояния откоса. Этот метод дает возможность на основе учета действующих сил, при различных стадиях размыва и формирования профиля равновесия оценить местную устойчивость профиля.

Рассмотрим частицу грунта, находящуюся на откосе ниже зоны разрушения волны (в подводной части отмели), по которой движется волновой поток. На рисунке 2 показана расчетная схема для некоторого элемента грунта, лежащего на поверхности отмели (откоса) объемом ( $W$ ) и площадью ( $F$ ).

Условие предельного равновесия элемента грунта, расположенного на откосе под углом  $\alpha$  к горизонту, будет определяться соотношением следующих сил:

- *сила тяжести  $G$  частицы, погруженной в воду  $G = W\gamma_0$ , где  $W$  – объем элемента грунта,  $m^3$ ;  $\gamma_0$  – удельный вес грунта во взвешенном водой состоянии,  $H/m^3$ ;*
- *предельная влекущая сила, создаваемая волновым потоком ( $\tau$ ), стремящаяся сдвинуть частицу вниз по откосу  $\tau = F\gamma_e h \sin \alpha$ ; где  $F$  – площадь элемента грунта,  $m^2$ ;  $\gamma_e$  – удельный вес воды,  $H/m^3$ ;  $h$  – глубина,  $m$ ;*
- *волновое взвешивающее давление  $P_{ск} = Fa \gamma_e h_e$ , где  $a$  – коэффициент равный 0,27, принятый по [18-20] (рисунок 3);*
- *удерживающая сила  $T_0 = W \gamma_0 \cos \alpha$ ,*
- *сдвигающая сила  $P_{ск} = W \gamma_0 \sin \alpha$ .*

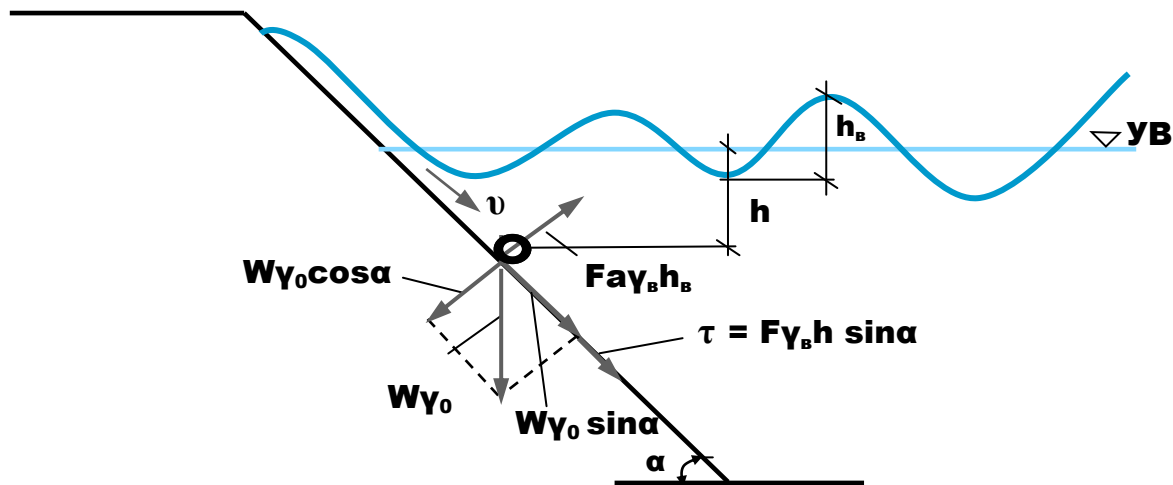


Рисунок 2. – Схема сил, действующих на частицу грунта на профиле равновесия

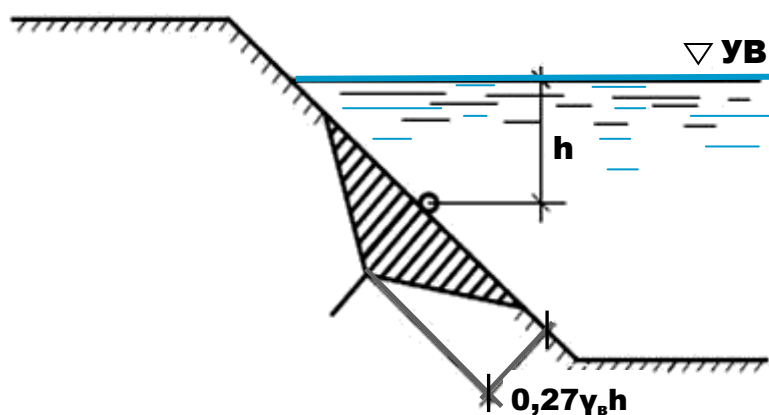


Рисунок 3. – Эпюра взвешивающего волнового давления [18]

Уравнение предельного равновесия имеет вид:

$$W\gamma_0\sin\alpha + F\gamma_b h \sin\alpha = (W\gamma_0\cos\alpha - F\gamma_b h_b)f, \quad (1)$$

разделив на F, получаем

$$d\gamma_0\sin\alpha + \gamma_b h \sin\alpha = d\gamma_0\cos\alpha f - \gamma_b h_b f, \quad (2)$$

разделив на  $\sin\alpha$ , имеем

$$d\gamma_0 + \gamma_b h + \gamma_b h_b f \sqrt{1+m^2} = d\gamma_0 m f \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент внутреннего трения грунта,  
 $d$  – диаметр частицы, м.

Разделив выражение (3) на  $d$ , а затем на  $\gamma_b$  получаем:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_b} + \frac{h}{d} + \frac{ah_b f \sqrt{1+m^2}}{d} = \frac{\gamma_0 m f}{\gamma_b} \quad (4)$$

Считая в во-  $\frac{\gamma_0}{\gamma_b} = \frac{\rho_0}{\rho_b} = \rho_0^I$ , де

где  $\rho_0$ ,  $\rho_b$  – плотность зерен грунта во в з в е -  
 шенном состоянии и воды, кг/м<sup>3</sup>; –  $\rho_0^I$  относитель-  
 ная плотность, равная  $\rho_0 / \rho_b$ , получаем

$$\rho_0^I + \frac{h}{d} + \frac{ah_b f \sqrt{1+m^2}}{d} = \rho_0^I m f. \quad (5)$$

Преобразовав (5), имеем

$$\frac{h}{d} + \frac{ah_b f \sqrt{1+m^2}}{d} = \rho_0^I (mf - 1). \quad (6)$$

Отношение правой части уравнения (6) к ле-  
 вой дает критерий устойчивости частиц грунта на  
 профиле динамического равновесия  $\Pi_1$ :

$$\Pi_1 = \frac{\rho_0^I (mf - 1)d}{h + ah_b f \sqrt{1+m^2}}. \quad (7)$$

В выражении (7) для несвязных однород-  
 ных грунтов с коэффициентом однородности  
 равным  $\eta = d_{60}/d_{10} \geq 2,5$ , величина  $d$  принимается  
 $d = d_{50}$ . Для условий грунтов с повышенной неод-  
 нородностью  $d = d_{85}$ .

На начальных стадиях переработки склона  
 (первой и второй) после заполнения водохранилища  
 величина  $\Pi_1$  всегда составляет величину менее 1,  
 т.к. происходит движение материала переработки  
 поперек склона и образование береговой отмели. На

третьей заключительной стадии формирования профиля, соответствующего профилю динамического равновесия, форма откоса приобретает устойчивую форму, а величина  $\Pi_1 \geq 1$ . Эта стадия характеризуется перемещением материала переработки только в продольном направлении в виде вдольберегового потока наносов [1-3,12,13], который формирует устойчивую равновесную береговую линию.

#### Устойчивость откоса при вдольбереговом перемещении материала переработки по профилю

Рассмотрим элемент грунта объемом ( $W$ ), находящийся в предельном равновесии под воздействием ветрового волнения на береговой отмели ниже зоны разрушения волн (рисунок 4). Основное воздействие на массив грунта оказывает гидравлическое давление волнового потока ( $P_\theta$ ), которое ведет к перемещению материала переработки склона по профилю. Вдольбереговой перенос частиц грунта в виде потока наносов вызван наличием двух условий: развитой широкой подводной частью береговой отмели и косопадающего к урезу фронта ветрового волнения под углом  $\Theta$ . Это позволяет представить ( $P_\theta$ ) в виде двух компонент: поперечной ( $P_{\theta y}$ ) и продольной ( $P_{\theta x}$ ), т.е. вдольбереговой.

Основное усилие, оказываемое на элемент грунта – гидравлическое давление, создаваемое волновым потоком при его перемещении по береговой

отмели (рисунок 4). Давление волнового потока, создаваемое придонными скоростями  $v_{\max}$  и его составляющими: продольной ( $P_{\theta x}$ ) и поперечной ( $P_{\theta y}$ ) равны [1-3,7-9, 12,13]:

$$P_{\theta x} = a_x F_y \gamma_\theta v_{\max}^2 / 2g$$

$$P_{\theta y} = a_y F_x \gamma_\theta v_{\max}^2 / 2g$$

Тогда равнодействующая сила  $P_\theta$  равна:

$$P_\theta = \sqrt{P_{\theta x}^2 + P_{\theta y}^2}.$$

Принимая площади проекции элемента грунта объемом ( $W$ ) на горизонтальную, вертикальную и перпендикулярную к равнодействующей ( $P_\theta$ ) плоскости, соответственно равными  $F_x = F_y = F$  [15], имеем

$$P_\theta = \frac{\gamma_\theta v_{\max}^2}{2g \sqrt{a_y^2 F_x^2 + a_x^2 F_y^2}}. \quad (8)$$

Приняв  $\sqrt{a_y^2 + a_x^2} = a_\theta$  и подставив в ( $P_\theta$ ), получаем:

$$P_\theta = \frac{a_\theta F \gamma_\theta v_{\max}^2}{2g}. \quad (9)$$

Натурные и лабораторные исследования ряда авторов по изучению режима донных волновых скоростей, а также проверка их с расчетными, показали, что они практически совпадают со скоростями

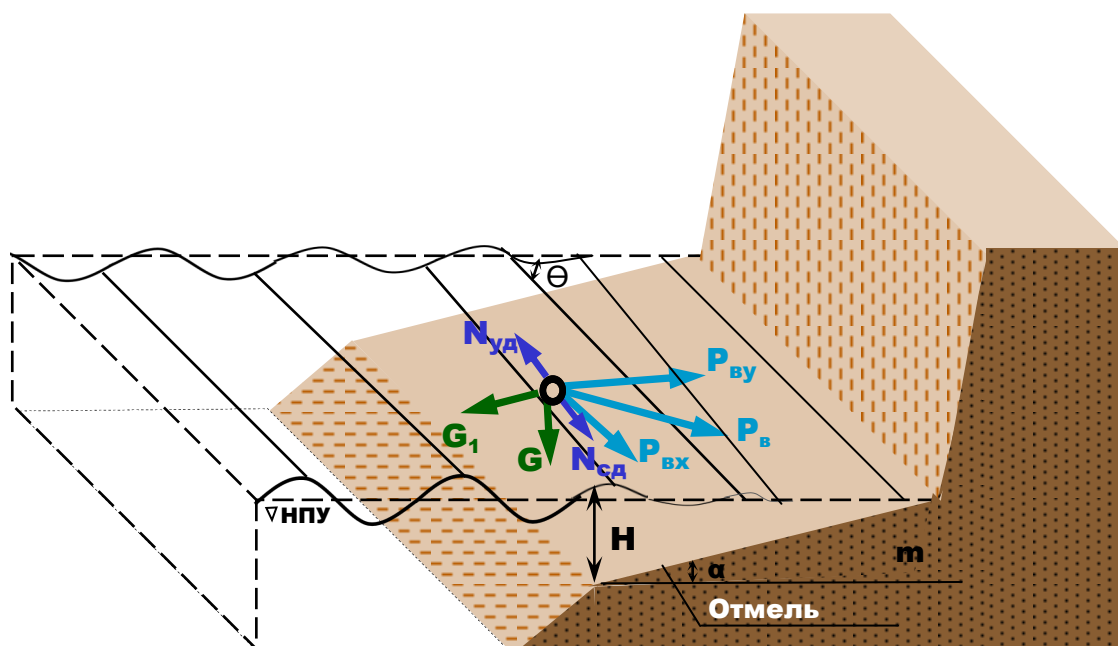


Рисунок 4. – Схема действия сил на элемент грунта в подводной части береговой отмели



руслового потока ( $v_{\max} = v_T$ ) [1-3]. Это подтверждают работы В.В. Лонгинова, З.А. Генина и И.Я. Попова, В.З. Аверина, Д.В. Джонсона, Д. Путнама, В. Мунка, М. Трейлора, Н.А. Айбулатова [1, 8, 9]. Следовательно:

$$v_{\max} = \frac{\pi h_e n}{\sqrt{\frac{\pi \lambda}{gsh\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right)}}}, \quad (10)$$

где  $h_e$  – расчетная высота волны, м;  $\lambda$  – длина волны, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H$  – глубина на внешнем краю отмели, м,  $n$  – коэффициент шероховатости принимается в соответствии с [4-6, 11]. Или преобразовав, получаем:

$$v_{\max}^2 = \frac{\pi^2 h_e^2 n^2}{\pi h_e} = \pi h_e n^2 gsh\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right). \quad (11)$$

Тогда произведя подстановку (11) в (9), получаем выражение для определения  $P_e$ :

$$P_e = 0,5a_0 F \gamma_e \pi h_e n^2 Sh\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right). \quad (12)$$

С учетом сил взвешивания грунта водой и внутреннего трения суммарная величина сдвигающей силы ( $N_{cd}$ ) определится:

$$N_{cd} = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + 0,25a_0^2 F^2 \gamma_e^2 \pi^2 h_e^2 n^4 Sh^2\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right)}. \quad (13)$$

Удерживающее усилие ( $N_{yd}$ ) определяется по формуле:

$$N_{yd} = \gamma_0 W f \cos \alpha, \quad (14)$$

где  $f$  – коэффициент внутреннего трения.

С учетом того, что вдольбереговая составляющая движения материала переработки в виде наносов может возникать только лишь при наличии разви-

той береговой отмели, а также косоподходящего ветрового волнения под углом  $\Theta$  к урезу воды (рисунок 3), в полученные зависимости ( $N_{cd}$ ) и ( $N_{yd}$ ) введена поправка, учитывающая угол подхода. После подстановки  $N_{yd}$  получаем формулы:

$$N_{cd} = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + 0,25a_0^2 F^2 \gamma_e^2 \pi^2 h_e^2 n^4 Sh^2\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right)} \cos \theta. \quad (15)$$

$$N_{yd} = \gamma_0 W f \cos \alpha \cos \theta. \quad (16)$$

Принимая в (15)  $\xi_1 = \gamma_0 W \sin \alpha$ ,

$\xi_2 = a_0 F \gamma_e \pi h_e n^2 Sh\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right) \cos \theta$ , имеем

$$N_{cd} = \sqrt{\xi_1^2 + 0,25\xi_2^2}. \quad (17)$$

Приравнявая сдвигающие и удерживающие силы получаем уравнение динамического равновесия для профиля абразионного берега.

Соотношение величин  $N_{cd}$  и  $N_{yd}$  будет являться критерием устойчивости продольного профиля динамического равновесия:

$$\Pi_2 = \frac{\sqrt{\xi_1^2 + 0,25\xi_2^2}}{\gamma_0 W f \cos \alpha \cos \theta}. \quad (18)$$

При значении  $\Pi_2 \geq 1$  профиль берега и береговая линия соответствуют равновесной форме. В противном случае, когда величина  $\Pi_2 < 1$  – берег находится в стадии интенсивной переработки.

### Заключение

Предложенные авторами критерии устойчивости поперечного и продольного профиля берега водохранилища, подверженного волновой переработке, позволяют учитывать комплекс нагрузок, действующих на отдельные частицы и элементы несвязного грунта на поверхности отмели (откоса), которые необходимы для расчета формы профиля динамического равновесия.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сокольников, Ю. Н. Инженерная морфодинамика берегов и её приложения / Ю. Н. Сокольников // Киев : Наукова думка, 1976. – 227 с.
2. Пышкин, Б. А. Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин // Киев : Наукова думка, 1973. – 416 с.
3. Максимчук, В. Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ / В. Л. Максимчук // Киев : Будзівельник, 1981. – 112 с.

4. Шайтан, В. С. Проектирование креплений земляных откосов на водохранилищах / В. С. Шайтан. – М. : Госстройиздат, 1962. – 215 с.
5. Шайтан, В. С. Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений / В. С. Шайтан // ВНИИ ВОДГЕО. – М. : Стройиздат, 1974. – 352 с.
6. Офицеров, А. С. Определение веса массивов и камня в теле оградительных сооружений и в защитных покрытиях / А. С. Офицеров // Инженерная гидравлика : сб. тр. – М. : Госстройиздат, 1961. – С. 5-35.
7. Зенкович, В. П. Основы учения о развитии морских берегов / В. П. Зенкович. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 710 с.
8. Лонгинов, В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей / В. В. Лонгинов. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 379 с.
9. Канарский, В. С. Устойчивость и прочность откосов земляных сооружений / В. С. Канарский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 146 с.
10. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилища для строительства. – М. : Стройиздат, 1987. – 68 с.
11. Технические условия определения волновых воздействий на морские и речные сооружения и берега : СН 92-60. – М. : Госстройиздат, 1960. – 60 с.
12. Левкевич, В. Е. Динамика берегов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.
13. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси /В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.
14. Михневич, Э. И. Новые типы креплений мелиоративных каналов / Э. И. Михневич. – Минск : Ураджай, 1978. – 128 с.
15. Михневич, Э. И. Устойчивость русел открытых водотоков / Э. И. Михневич. – Минск : Ураджай, 1988. – 240 с.
16. Ничипорович, А. А. Плотины из местных материалов : учеб. пособ. для вузов / А. А. Ничипорович. – М. : Стройиздат, 1973. – 320 с.
17. Соболевский, Ю. А. Устройство откосов мелиоративных каналов / Ю. А. Соболевский. – Минск : Ураджай, 1965. – 252 с.
18. Алперин, И. Е. Укрепление берегов судоходных каналов, рек и водохранилищ / И. Е. Алперин, П. С.Быков, В. Б.Гуревич. – М. : Транспорт, 1973. – 216 с.
19. Метелицына, Г. Г. Волновое давление и высота наката волн на крутонаклонные стенки / Г. Г. Метелицына, М. Э. Плакида // Вопросы гидротехники : сб. тр. – М. : Речной транспорт, 1958. – Вып. 15. – С. 45–47.
20. Плакида, М. Э. Оградительные сооружения при транспортном освоении водохранилищ / М. Э. Плакида // Вопросы гидротехники / Труды ЦНИИЭВТа. – М. : Речной транспорт, 1958. – Вып. XV. – С. 49-63.

Поступила 1.09. 2016 г.